

Invited Article

รางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ ประจำปี 2025: การทะลุผ่านเชิงควอนตัมระดับมหภาคและการควอนไทซ์พลังงานในวงจรไฟฟ้า

The 2025 Nobel Prize in Physics: Macroscopic Quantum Mechanical Tunnelling and Energy Quantisation in an Electric Circuit

สลิลพร กิตติวัฒนากุล

Salinporn Kittiwatanakul

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Patumwan, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author E-mail: salinporn.k@chula.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 สิงหาคม 2569, วันแก้ไขบทความ: 31 สิงหาคม 2569, วันตอบรับบทความ: 1 กันยายน 2569

Received: 4th August 2026, Revised: 31st August 2026, Accepted: 1st September 2026

บทคัดย่อ

เมื่อวันที่ 7 ตุลาคม 2025 ราชบัณฑิตยสถานวิทยาศาสตร์แห่งสวีเดนประกาศมอบรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ประจำปี 2025 ให้แก่จอห์น คลาร์ก มิเชล เดโวจีโร และจอห์น มาร์ตินิส จากผลงานการค้นพบปรากฏการณ์การทะลุผ่านเชิงควอนตัมระดับมหภาค (Macroscopic quantum mechanical tunnelling) และการควอนไทซ์พลังงานในวงจรไฟฟ้าที่มีจุดต่อโจเซฟสัน (Josephson junction) บทความนี้ทบทวนภูมิหลังทางทฤษฎีตั้งแต่การทำนายของไบรอัน โจเซฟสัน ในปี 1962 และข้อเสนอของแอนโทนี เล็กเกตต์ ในปี 1980 เกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่สถานะควอนตัมมหภาคจะทะลุผ่านกำแพงพลังงาน ก่อนอธิบายวิธีการทดลองและผลการค้นพบที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ในช่วงปี 1984-1985 ซึ่งยืนยันทั้งปรากฏการณ์การทะลุผ่านเชิงควอนตัม และการมีอยู่ของระดับพลังงานไม่ต่อเนื่องในวงจรระดับมหภาค บทความยังนำเสนอสมการพื้นฐานของจุดต่อโจเซฟสัน วิเคราะห์กลไกทางฟิสิกส์ ที่เชื่อมโยงการค้นพบนี้เข้ากับการออกแบบซูเปอร์คอนดักติ้งคิวบิต (Superconducting qubit) แบบ Transmon และอธิบายบทบาทของตู้เย็นเจือจาง (Dilution refrigerator) ในการรักษาอุณหภูมิระดับมิลลิเคลวินที่จำเป็นต่อการสังเกตปรากฏการณ์เชิงควอนตัมเหล่านี้ ผลการทบทวนชี้ให้เห็นว่าการค้นพบนี้เป็นหลักฐานเชิงประจักษ์สำคัญที่แสดงว่ากฎของกลศาสตร์ควอนตัมสามารถขยายขอบเขตจากระดับอะตอมไปสู่ระบบขนาดมหภาคที่มนุษย์สร้างขึ้นได้จริง และเป็นรากฐานโดยตรงของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ควอนตัมในปัจจุบัน

คำสำคัญ: รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ 2025, จุดต่อโจเซฟสัน, การทะลุผ่านเชิงควอนตัมระดับมหภาค, การควอนไทซ์พลังงาน, ซูเปอร์คอนดักติ้งคิวบิต, ตู้เย็นเจือจาง, คอมพิวเตอร์ควอนตัม

Abstract

On 7 October 2025, the Royal Swedish Academy of Sciences announced the award of the 2025 Nobel Prize in Physics to John Clarke, Michel Devoret, and John Martinis for their discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit containing a Josephson junction. This article reviews the theoretical background, beginning with Brian Josephson's 1962 prediction and Anthony Leggett's 1980 proposal on the possibility that a macroscopic quantum state could tunnel through an energy barrier, before describing the experimental methods and findings at the University of California, Berkeley, during 1984-1985 that confirmed both the tunnelling phenomenon and the existence of discrete energy levels in a macroscopic circuit. The article further presents the fundamental equations of the Josephson junction, analyses the physical mechanisms linking this discovery to the design of the transmon superconducting qubit, and explains the role of the dilution refrigerator in maintaining the millikelvin temperatures required to observe these quantum phenomena. The review indicates that this discovery constitutes important empirical evidence that the laws of quantum mechanics can extend from the atomic scale to human-engineered macroscopic systems, and that it forms a direct foundation for present-day quantum computing technology.

Keywords: 2025 Nobel Prize in Physics, Josephson junction, macroscopic quantum tunnelling, energy quantisation, superconducting qubit, dilution refrigerator, quantum computer

บทนำ

เมื่อวันที่ 7 ตุลาคม 2025 ราชบัณฑิตยสถานวิทยาศาสตร์แห่งสวีเดน (Royal Swedish Academy of Sciences) ประกาศมอบรางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ ประจำปี 2025 ให้แก่นักฟิสิกส์ 3 คน ได้แก่ จอห์น คลาร์ก (John Clarke) แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ มิเชล เดโวเรต์ (Michel H. Devoret) แห่งมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซานตาบาร์บารา และจอห์น มาร์ตินิส (John M. Martinis) แห่งบริษัท Qolab จากผลงาน “การค้นพบปรากฏการณ์การทะลุผ่านเชิงควอนตัม ระดับมหภาคและการควอนไทซ์พลังงานในวงจรไฟฟ้า” [1]

ผลงานนี้มีที่มาจากการทดลองที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ในช่วงกลางทศวรรษ 1980 ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นครั้งแรกว่ากฎของกลศาสตร์ควอนตัม อันเป็นกฎที่ปกติใช้อธิบายพฤติกรรมของอนุภาคระดับอะตอมเท่านั้น สามารถปรากฏให้เห็นได้อย่างชัดเจนในวงจรไฟฟ้าขนาดมหภาคที่ มนุษย์สร้างขึ้นด้วยมือ [2,3] บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนภูมิหลังทางทฤษฎี สมการพื้นฐาน วิธีการทดลอง และผลกระทบเชิงเทคโนโลยีของการค้นพบดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งบทบาทของมันในการวางรากฐานให้แก่ซูเปอร์คอนดักติ้งคิวบิตและตู้เย็นเจือจางที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ควอนตัมปัจจุบัน

ผู้ได้รับรางวัลทั้งสามคน

จอห์น คลาร์ก เกิดเมื่อปี 1942 ที่เมืองเคมบริดจ์ สหราชอาณาจักร สำเร็จปริญญาตรีและปริญญาเอกด้านฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ก่อนย้ายไปทำวิจัยหลังปริญญาเอกที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ในปี 1969 และอยู่ที่นั่นในฐานะอาจารย์มาโดยตลอดนับแต่นั้น ปัจจุบันเป็นศาสตราจารย์กิตติคุณ [4]

มิเชล เดโวเรต์ เกิดที่กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส เมื่อปี 1953 จบการศึกษาจาก Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications และปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยปารีส-ออร์แซ ในปี 1982 จากนั้นเดินทางมาทำวิจัยร่วมกับกลุ่มของคลาร์กที่เบิร์กลีย์ ก่อนกลับฝรั่งเศส ไปตั้งกลุ่มวิจัยของตนเองที่ CEA-Saclay แล้วย้ายไปมหาวิทยาลัยเยลในปี 2002 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซานตาบาร์บารา และดำรงตำแหน่งหัวหน้านักวิทยาศาสตร์ฝ่ายฮาร์ดแวร์ควอนตัมของ Google Quantum AI [1,4]

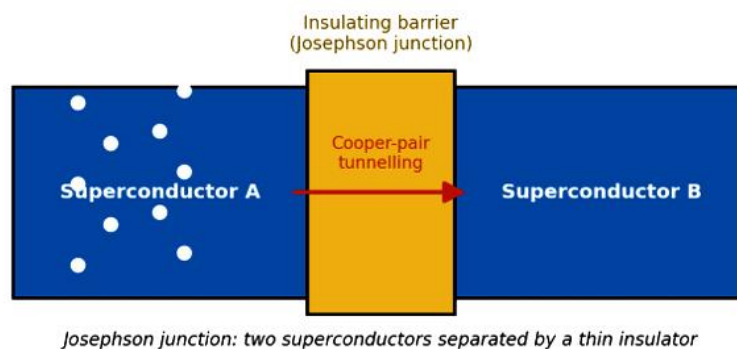
จอห์น มาร์ตินิส เกิดในสหรัฐอเมริกาเมื่อปี 1958 สำเร็จการศึกษาทั้ง ปริญญาตรีและปริญญาเอกด้านฟิสิกส์จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ในช่วงที่ทำการทดลองสำคัญนี้ เขาเป็นนักศึกษาปริญญาเอก ในกลุ่มวิจัยของคลาร์ก ต่อมาย้ายไปมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซานตาบาร์บารา นำทีมวิจัยเข้าร่วม Google ในปี 2014 เพื่อพัฒนา คอมพิวเตอร์ควอนตัม ก่อนร่วมก่อตั้งบริษัท Qolab ในปี 2022 ซึ่งปัจจุบัน เขาดำรงตำแหน่งประธานเจ้าหน้าที่ฝ่ายเทคโนโลยี [1,4]

พื้นฐานทางทฤษฎี: ปรากฏการณ์โจเซฟสันและการทะลุผ่านเชิงควอนตัมระดับมหภาค

รากฐานของการค้นพบนี้ย้อนไปถึงปี 1962 เมื่อไบรอัน โจเซฟสัน (Brian Josephson) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ทำนายว่าหากนำตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) สองชิ้นมาวางประกบกันโดยมีฉนวนบางกั้นกลาง คู่คูเปอร์ (Cooper pair) ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนคู่ที่พาประจุไฟฟ้าในตัวนำยิ่งยวด จะสามารถ “ทะลุผ่าน” ฉนวนนั้นได้ โดยไม่มีความต้านทาน ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า Josephson effect [5] กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจุดต่อขึ้นกับผลต่างเฟสของฟังก์ชันคลื่น φ ระหว่างตัวนำยิ่งยวดทั้งสองฝั่ง ตามความสัมพันธ์กระแส-เฟส (Current-Phase relation) ดังสมการที่ (1)

$$I = I_c \sin(\varphi) \quad (1)$$

โดยที่ I_c คือกระแสวิกฤต (Critical current) ของจุดต่อ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยตัวนำยิ่งยวดสองชิ้นคั่นด้วยฉนวนบาง ๆ เรียกว่า Josephson junction ซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานที่ใช้ในวงจรควอนตัม แทบทุกชนิดในปัจจุบัน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 Josephson junction ประกอบด้วยตัวนำยิ่งยวดสองชิ้นคั่นด้วยฉนวนบาง คู่คูเปอร์สามารถทะลุผ่านฉนวนได้ตามทฤษฎีของโจเซฟสัน [5]

Fast fact:

- ผู้รับรางวัล: John Clarke, Michel H. Devoret, John M. Martinis
- ผลงาน: การค้นพบการทะลุผ่านเชิงควอนตัมระดับมหภาคและการควอนไทซ์พลังงานในวงจรไฟฟ้า
- ประกาศผล: 7 ตุลาคม 2025 โดย Royal Swedish Academy of Sciences
- มูลค่ารางวัล: 11 ล้านโครนสวีเดน (ราว 1.2 ล้านดอลลาร์สหรัฐ) แบ่งเท่ากันสามคน
- พิธีมอบรางวัล: 10 ธันวาคม 2025 ณ กรุงสตอกโฮล์ม สวีเดน

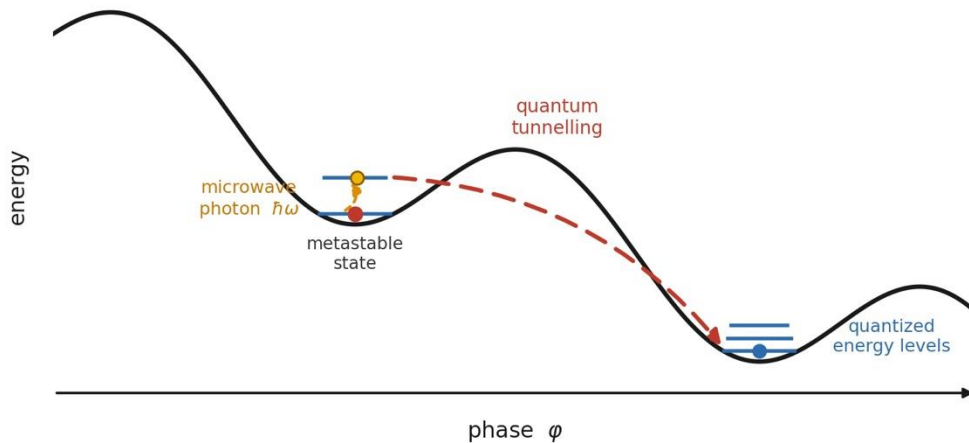
เมื่อจ่ายกระแส I เข้าสู่จุดต่อ พลังงานศักย์ของระบบเขียนเป็นฟังก์ชัน ของเฟส φ ได้ดังสมการที่ (2)

$$U(\varphi) = -E_J \cos(\varphi) - (\hbar I / 2e) \varphi \quad (2)$$

ฟังก์ชันนี้มีรูปร่างคล้าย “กระดานซีกฟ้าเอียง” (Tilted washboard) ที่มีหลุมพลังงานศักย์ซ้อนกันเป็นระยะ ๆ ดังรูปที่ 2 ระบบที่ติดอยู่ใน หลุมหนึ่งจะสั่นด้วยความถี่พลาสมา (Plasma frequency) ประมาณสมการที่ (3)

$$\omega_p = \omega_{p0} [1 - (I/I_c)^2]^{1/4} \quad (3)$$

$$\omega_p = \omega_{p0} [1 - (I/I_c)^2]^{1/4} \quad (3')$$



รูปที่ 2 แบบจำลองศักย์แบบ “กระดานซีกฟ้า” (Washboard potential) ของ Josephson junction ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แสดงสถานะกึ่งเสถียร การกระตุ่นระหว่างระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องด้วยโฟตอนไมโครเวฟ (□□) และการทะลุผ่านกำแพงพลังงานเชิงควอนตัมไปสู่หลุมศักย์ถัดไป [2, 3]

ความถี่นี้จะลดลงเมื่อกระแส I เข้าใกล้ค่ากระแสวิกฤต I_c ทำให้กำแพงพลังงานที่กั้นระหว่างหลุมข้างเคียงต่ำลงเรื่อย ๆ สถานะพลังงาน ต่ำสุดของตัวนำยิ่งยวดเป็นสถานะควอนตัมระดับมหภาค กล่าวคือ คู่ คูเปอร์นับล้าน ๆ คู่ ในวัสดุถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันคลื่นเดียวกันทั้งหมด

ในปี 1980 แอนโทนี เล็กเกตต์ (Anthony Leggett) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ-อเมริกัน เสนอแนวคิดที่ว่าสถานะมหภาคทั้งก้อนนี้ควรจะสามารถ “ทะลุผ่านกำแพงพลังงาน” ได้เช่นเดียวกับอนุภาคเดี่ยว [6] หากสามารถวัดปรากฏการณ์นี้ได้จริงในห้องทดลอง ก็จะเป็นหลักฐานว่า กลศาสตร์ควอนตัมใช้ได้กับวัตถุขนาดใหญ่ระดับที่มองเห็นและจับต้องวางจริงได้ ไม่ใช่แค่อนุภาคมูลฐาน

วิธีการทดลองและผลการค้นพบที่เบิร์กลีย์

ความพยายามครั้งแรก ๆ ในการสังเกตปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในปี 1981 เมื่อวอर्सและเวบบ์รายงานหลักฐานเบื้องต้นของการทะลุผ่าน เชิงควอนตัมใน Josephson junction ขนาดไมโครเมตร แต่ผลการทดลองยังไม่สามารถแยกแยะผลของสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจากปรากฏการณ์ควอนตัมได้อย่างสมบูรณ์ [7]

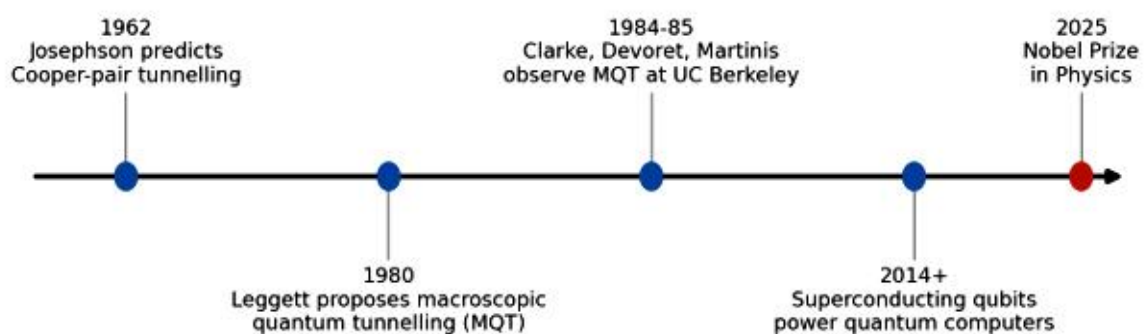
ต่อมาในช่วงปี 1984-1985 ทีมมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ คลาร์ก เดโวเรต (ซึ่งขณะนั้นเป็นนักวิจัยหลังปริญญาเอก) และมาร์ตินิส (นักศึกษาปริญญาเอก) ได้ออกแบบการทดลองที่ควบคุมสัญญาณรบกวนอย่างเข้มงวด เพื่อค้นหาหลักฐานที่แน่ชัดของ Macroscopic quantum tunnelling (MQT) แนวคิดคือการปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจุดต่อ โดยไม่มีความต้านทานและไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ซึ่งเป็น “สถานะกึ่งเสถียร” (Metastable state) หากระบบเป็นสถานะ ควอนตัมมหภาคจริง ระบบควรมีโอกาสทะลุผ่านกำแพงพลังงาน ออกจากสถานะนี้เป็นครั้งคราวโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานความร้อน ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขึ้นอย่างฉับพลัน [2]

อัตราการทะลุผ่านกำแพงพลังงานมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของระบบต่ำกว่าอุณหภูมิจุดตัดเชิงควอนตัม-ความร้อน (Quantum-to-thermal crossover temperature) T^* ซึ่งมีอันดับขนาดประมาณ $kBT^* \sim \hbar\omega_p$ ต่ำกว่าอุณหภูมินี้ กลไกการทะลุผ่านเชิงควอนตัมจะครอบงำเหนือกลไก การกระโดดข้ามกำแพงด้วยพลังงานความร้อน (Thermal activation) [2]

ทีมวิจัยวัดค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นจากการวัดซ้ำหลายครั้ง เมื่อลดอุณหภูมิของอุปกรณ์ลง ค่ากระแสเฉลี่ยนี้เพิ่มขึ้นตามที่คาดไว้ ไม่ว่าจะเป็นปรากฏการณ์ควอนตัมหรือไม่ก็ตาม แต่สิ่งที่เป็นลายเซ็นเฉพาะ ของ MQT คือ เมื่ออุณหภูมิต่ำมากเป็นพิเศษ ค่ากระแสเฉลี่ยกลับไม่ขึ้นกับอุณหภูมิอีกต่อไป และสอดคล้องอย่างดีกับค่าที่ทำนายไว้ทางทฤษฎี โดยไม่ต้องปรับพารามิเตอร์ใด ๆ ซึ่งบ่งชี้ว่าการทะลุผ่านเกิดจากกลไกควอนตัมล้วน ๆ ไม่ใช่พลังงานความร้อน [2] นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังรายงานผลการทดลองอีกชุดหนึ่ง ที่แสดงให้เห็นว่าสถานะควอนตัมมหภาคนี้มีระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง (Quantized energy levels) หลายระดับซ้อนกันอยู่ ทำให้ Josephson junction ทำหน้าที่เสมือน “อะตอมเทียม” ขนาดมหภาคที่มีโครงสร้างพลังงานสอดคล้องกับการคำนวณเชิงกลศาสตร์ควอนตัม [3]

ผลกระทบต่อเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ควอนตัม

เทคนิคการควบคุมสัญญาณรบกวนที่พัฒนาขึ้นในการทดลองครั้งนี้ ผสมกับคุณสมบัติการเป็นระบบควอนตัมหลายระดับ ได้กลายเป็นรากฐานสำคัญของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ควอนตัมเชิงพาณิชย์ที่ใช้วงจรตัวนำยิ่งยวดในปัจจุบัน (รายละเอียดเชิงฟิสิกส์ของคิวบิตกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป) [4,8] บริษัทเทคโนโลยีชั้นนำ เช่น Google และ IBM รวมถึงบริษัทสตาร์ทอัพจำนวนมาก ล้วนใช้หลักการ Josephson junction และ Superconducting qubit ที่มีรากฐานจากการค้นพบนี้เป็นแกนหลักในการสร้างเครื่องประมวลผลควอนตัม [8] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เส้นเวลาสำคัญ จากการทำนายของโจเซฟสันในปี 1962 สู่รางวัลโนเบลฟิสิกส์ปี 2025 [1,2,5,6]

โอลเล เอริกซอน (Olle Eriksson) แห่งมหาวิทยาลัยอุปซอลา ประธานคณะกรรมการโนเบลสาขาฟิสิกส์ กล่าวว่า “ไม่มีเทคโนโลยีล้ำสมัยใดในปัจจุบันที่ไม่ได้พึ่งพาฟิสิกส์ควอนตัม” ขณะที่เกอร์ราน โยฮันส์สัน (Göran Johansson) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีชาลเมอर्स อธิบายว่านักวิจัยทั้งสามได้ “นำการทะลุผ่านเชิงควอนตัมจากโลกจุลภาค ขึ้นมาสู่ชิปตัวนำยิ่งยวด” ทำให้นักฟิสิกส์สามารถศึกษาปรากฏการณ์ ควอนตัมและสร้างคอมพิวเตอร์ควอนตัมได้ในที่สุด [1] จอห์น คลาร์ก เองยอมรับว่า “พื้นฐานของคอมพิวเตอร์ควอนตัมนั้นอาศัยการค้นพบของเราอยู่ไม่น้อยเลยทีเดียว” [1,8]

ซูเปอร์คอนดักติวิตี: จากจุดต่อโจเซฟสันสู่คิวบิตควอนตัม

หัวใจสำคัญที่เชื่อมโยงการค้นพบทางฟิสิกส์พื้นฐานนี้เข้ากับเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ควอนตัม คือคุณสมบัติไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) ของ Josephson junction วงจร LC ธรรมดาที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเชิงเส้นจะมีระดับพลังงานห่างเท่ากันแบบฮาร์มอนิก (Harmonic oscillator) ซึ่งใช้เป็นคิวบิต (Qubit) ไม่ได้ เพราะไม่สามารถกระตุ้นเฉพาะสองระดับล่างสุดโดยไม่รบกวนระดับที่สูงกว่า แต่เมื่อแทนที่ตัวเหนี่ยวนำด้วย Josephson junction ซึ่งมีพจน์พลังงาน $\cos(\varphi)$ ไม่เชิงเส้น ระดับพลังงานของวงจรจะห่างกันไม่เท่ากัน (Anharmonic) ทำให้สามารถเลือกกระตุ้นเฉพาะสองระดับล่างสุด $|0\rangle$ และ $|1\rangle$ ให้ทำหน้าที่เป็นคิวบิตได้ [9,10]

แบบจำลองที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดคือ Transmon ซึ่งอธิบายด้วย แฮมิลโทเนียน ดังสมการที่ (4)

$$\hat{H} = 4E_C \hat{n}^2 - E_J \cos(\varphi) \quad (4)$$

โดยที่ E_C คือพลังงานประจุ (Charging energy) ของตัวเก็บประจุ $\hat{n}$ คือตัวดำเนินการจำนวนคู่อุปเปอร์ (Cooper-pair number operator) และ E_J คือพลังงานโจเซฟสัน (Josephson energy) [9] เมื่อออกแบบวงจรให้อยู่ในย่าน $E_J/E_C \gg 1$ ซึ่งเรียกว่าย่าน Transmon ความถี่คิวบิตและความไม่เป็นฮาร์มอนิก (Anharmonicity) จะประมาณได้ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\hbar\omega_{01} \approx \sqrt{8E_J E_C} - E_C \quad (5)$$

$$\alpha = \omega_{12} - \omega_{01} \approx -E_C \quad (6)$$

การออกแบบในย่านนี้ช่วยลดความไวของคิวบิตต่อสัญญาณรบกวนจากประจุพเนจร (Charge noise) ได้อย่างมาก ซึ่งเคยเป็นแหล่งความไม่ต่อเนื่องของเฟส (Decoherence) ที่สำคัญในคิวบิตยุคแรก ๆ [9] คิวบิตแบบ Transmon แต่ละตัวยังเชื่อมต่อกับเรโซเนเตอร์ไมโครเวฟ (Readout resonator) เพื่อใช้อ่านค่าสถานะโดยไม่รบกวนสถานะควอนตัมมากเกินไป เทคนิคการวัดสัญญาณอ่อนโดยไม่ให้สัญญาณรบกวนจากภายนอกทำลายสถานะควอนตัม ซึ่งพัฒนาขึ้นครั้งแรก ในการทดลอง MQT ปี 1985 [2,3] จึงเป็นรากฐานโดยตรงของเทคนิคการอ่านค่าคิวบิตในคอมพิวเตอร์ควอนตัมปัจจุบัน [10]

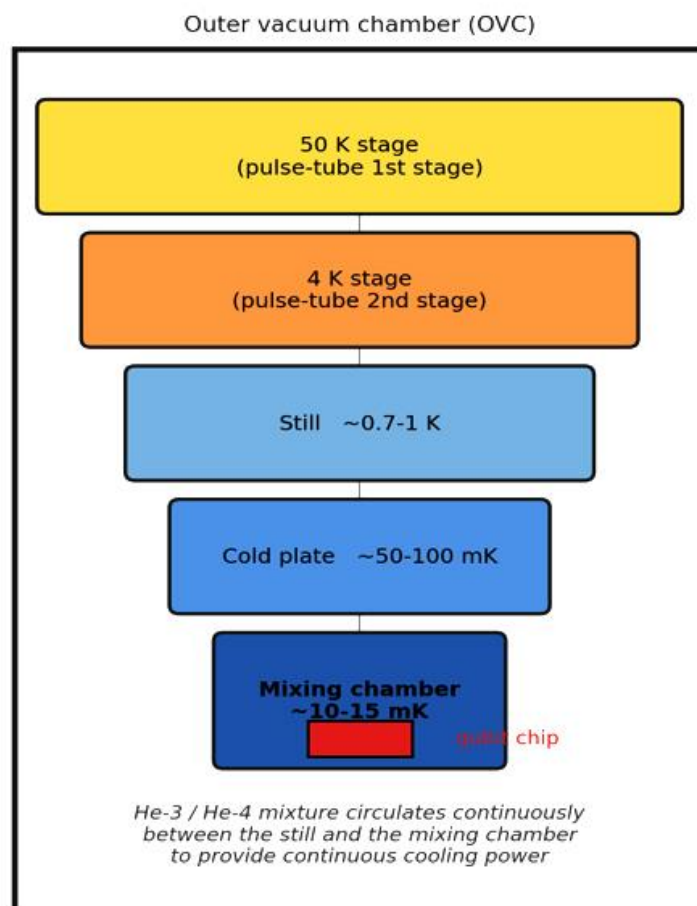
ระบบทำความเย็นระดับมิลลิเคลวิน: ตู้เย็นเจือจาง

คุณสมบัติเชิงควอนตัมของ Josephson junction ไม่ว่าจะเป็นการทะลุผ่านเชิงควอนตัมระดับมหภาคในการทดลองปี 1985 หรือการทำงานของคิวบิตในปัจจุบัน จะปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของระบบต่ำมากพอที่ พลังงานความร้อน $k_B T$ จะน้อยกว่าช่องว่างพลังงานระหว่างระดับพลังงาน $\hbar\omega_{01}$ ของระบบอย่างมาก มิฉะนั้นความผันผวนทางความร้อนจะกระตุ้น ให้ระบบหลุดออกจากสถานะพื้นและทำลายพฤติกรรมเชิงควอนตัมที่ต้องการศึกษา [10] ด้วยเหตุนี้ ทั้งการทดลองดั้งเดิมที่เบิร์กลีย์และคอมพิวเตอร์ควอนตัมสมัยใหม่จึงต้องอาศัย

ตู้เย็นเจือจาง (Dilution refrigerator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชนิดเดียวที่สามารถรักษาอุณหภูมิต่อเนื่องในระดับ 10-15 มิลลิเคลวิน (mK) หรือประมาณ -273.14 องศาเซลเซียสได้

หลักการทำงานของตู้เย็นเจือจางของฮีเลียม-3 (He-3) เมื่อผสมกับฮีเลียม-4 (He-4) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าประมาณ 0.87 เคลวิน ของผสมจะแยกออกเป็นสองเฟส คือเฟสเข้มข้นที่มี He-3 เป็นส่วนใหญ่ และเฟสเจือจางที่มี He-3 ละลายอยู่ในของเหลว He-4 เมื่อบังคับให้อะตอม He-3 เคลื่อนจากเฟสเข้มข้นข้ามผ่านขอบเขตเฟสเข้าสู่เฟสเจือจาง ในห้องที่เรียกว่า Mixing chamber กระบวนการนี้จะดูดซับความร้อนในลักษณะคล้ายกับการระเหย ทำให้เกิดความเย็นต่อเนื่องได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ ถึงหลักมิลลิเคลวิน [10]

ระบบทำความเย็นเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันมักประกอบด้วยหลายขั้นตอนต่อเนื่องกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 เริ่มจากชั้นพัลส์ทิวบ์ (Pulse-tube) สองชั้นที่ลดอุณหภูมิจากห้อง (ประมาณ 300 K) ลงเหลือประมาณ 50 K และ 4 K ตามลำดับ จากนั้นเข้าสู่ห้อง Still ที่อุณหภูมิประมาณ 0.7-1 K ซึ่งเป็นจุดที่ไอ He-3 ถูกสุบวนกลับเข้าสู่วงจร ก่อนไหลผ่านแผ่นเย็น (Cold plate) ที่ประมาณ 50-100 mK และลงสู่ Mixing chamber ที่อุณหภูมิฐาน (Base temperature) เพียง 10-15 mK ซึ่งเป็นจุดที่ติดตั้งชิปควิบิต หรือตัวอย่างทดลองไว้ [10]



Schematic of a dilution refrigerator: successive cooling stages from room temperature down to the mixing chamber at about 10-15 mK

รูปที่ 4 แผนผังตู้เย็นเจือจาง แสดงขั้นตอนการทำความเย็นต่อเนื่องจากอุณหภูมิห้องจนถึง Mixing chamber ที่ประมาณ 10-15 mK ซึ่งเป็นจุดติดตั้งชิปควิบิต [10]

ข้อควรทราบ: โครงสร้างทรงกระบอกซ้อนกันเป็นชั้น ๆ สีทองในรูปที่ 5 ซึ่งมักปรากฏในภาพข่าวคอมพิวเตอร์ควอนตัม (เช่นของ IBM หรือ Google) คือตู้เย็นเจือจางนี้เอง ไม่ใช่ตัวคอมพิวเตอร์ควอนตัมหรือชิปควิบิตแต่อย่างใด ชิปควิบิตจริงมีขนาดเพียงไม่กี่เซนติเมตร ถูกติดตั้งซ่อนอยู่ที่ปลายล่างสุดของโครงสร้างนี้ภายใน Mixing chamber ซึ่งเป็นจุดที่เย็นที่สุด [10,11]

อุณหภูมิระดับนี้จำเป็นด้วยเหตุผลหลักสองประการ ประการแรก คือลดจำนวนโฟตอนความร้อน (Thermal photon) ในวงจรให้เกือบเป็นศูนย์ ประการที่สอง คือลดโอกาสที่คู่คูเปอร์จะแตกตัวเป็นกึ่งอนุภาค (Quasiparticle) เดียว ซึ่งเป็นแหล่งความไม่ต่อเนื่องของเฟสที่สำคัญในควิบิตตัวนำยิ่งยวด [10] กล่าวได้ว่าตู้เย็นเจือจางเป็นโครงสร้าง พื้นฐานที่มองไม่เห็นแต่ขาดไม่ได้ อยู่เบื้องหลังทั้งการค้นพบรางวัลโนเบลปี 2025 และคอมพิวเตอร์ควอนตัมเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน



รูปที่ 5 ตู้เย็นเจือจางจริงที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัม แสดงแผ่นทองแดงชุบทองซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ตามชั้นอุณหภูมิต่าง ๆ [11]

มรดกโนเบลที่เกี่ยวข้องกัน

การค้นพบของคลาร์ก เดไวเรต์ และมาร์ตินิส ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างโดดเดี่ยว แต่ยืนอยู่บนไหล่ของนักฟิสิกส์ผู้ได้รับรางวัลโนเบลมาก่อนหน้าถึงสองครั้ง ครั้งแรกคือปี 1973 เมื่อไบรอัน โจเซฟสัน ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ร่วมกับลีโอ เอซากิ และไอวาร์ จีเอเวอร์ จากผลงานเรื่อง ปรากฏการณ์การทะลุผ่านเชิงควอนตัมในสารกึ่งตัวนำและตัวนำยิ่งยวด ครั้งที่สองคือปี 2003 เมื่อแอนโทนี เล็กเกตต์ ได้รับรางวัลร่วมกับ อเล็กเซ อาบรี โคซอฟ และวิทาลี กินช์บูร์ก จากทฤษฎีตัวนำยิ่งยวดและของไหลยิ่งยวด [8] การที่รางวัลปี 2025 เชื่อมโยงกับรากฐานทฤษฎีทั้งสองครั้งนี้ ตอกย้ำให้เห็นเส้นทางอันต่อเนื่องของวงการฟิสิกส์ตัวนำยิ่งยวดตลอดกว่าครึ่งศตวรรษ จากทฤษฎีล้วน ๆ สู่การทดลองยืนยัน และสู่เทคโนโลยีที่ใช้งานได้จริงในที่สุด

บทสรุป

การค้นพบของจอห์น คลาร์ก มิเชล เดโวเรต์ และจอห์น มาร์ตินิส ตอกย้ำให้เห็นว่าเส้นแบ่งระหว่างโลกควอนตัมจุลภาคกับโลกมหภาคที่เรามองเห็นและจับต้องได้นั้น ไม่ได้ชัดเจนตายตัวอย่างที่เคยเข้าใจกัน [2,3] งานวิจัยที่เริ่มต้นจากความอยากรู้อยากเห็นทางฟิสิกส์พื้นฐานเมื่อกว่าสี่ทศวรรษก่อน ได้กลายเป็นรากฐานของสมการควบคุมควิบิต เทคโนโลยี ตู้เย็นเจือจาง และคอมพิวเตอร์ควอนตัมที่กำลังเปลี่ยนโฉมหน้าอุตสาหกรรมคำนวณ การเข้ารหัส และวัสดุศาสตร์ในศตวรรษที่ 21 [4,8,10]

งานวิจัยในอนาคตยังมีแนวโน้มที่จะขยายขอบเขตของการทดลองลักษณะนี้ไปสู่ระบบควอนตัมมหภาคชนิดอื่น เพื่อทำความเข้าใจรอยต่อระหว่างโลกควอนตัมกับโลกคลาสสิกให้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น และยังคงเป็นตัวอย่างสำคัญที่แสดงให้เห็นว่าวิทยาศาสตร์พื้นฐานสามารถนำไปสู่นวัตกรรมที่พลิกโฉมโลกได้อย่างไม่คาดคิด

Acknowledgement

บทความนี้ใช้ Claude Sonnet 5 ในการพัฒนาและทวนสอบบทความ

References

- [1] The Royal Swedish Academy of Sciences, “The Nobel Prize in Physics 2025 – Press release”, from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/press-release/>. Access on July 27th, 2026.
- [2] M. H. Devoret, J. M. Martinis and J. Clarke, “Measurements of macroscopic quantum tunneling out of the zero-voltage state of a current-biased Josephson junction”, *Physical Review Letters*, 55, 1908–1911 (1985).
- [3] J. M. Martinis, M. H. Devoret and J. Clarke, “Energy-level quantization in the zero-voltage state of a current-biased Josephson junction”, *Physical Review Letters*, 55, 1543–1546 (1985).
- [4] American Institute of Physics, “AIP Congratulates 2025 Nobel Prize Winners in Physics”, from <https://www.aip.org/aip/aip-congratulates-2025-nobel-prize-winners-in-physics>. Access on July 27th, 2026.
- [5] B. D. Josephson, “Possible new effects in superconductive tunnelling”, *Physics Letters*, 1, 251–253 (1962).
- [6] A. J. Leggett, “Macroscopic quantum systems and the quantum theory of measurement”, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 69, 80–100 (1980).
- [7] R. F. Voss and R. A. Webb, “Macroscopic quantum tunneling in 1- μm Nb Josephson junctions”, *Physical Review Letters*, 47, 265–268 (1981).
- [8] H. Johnston, “John Clarke, Michel Devoret and John Martinis win the 2025 Nobel Prize for Physics”, from <https://physicsworld.com/a/john-clarke-michel-devoret-and-john-martinis-win-the-2025-nobel-prize-for-physics/>. Access on July 27th, 2026.
- [9] J. Koch, T. M. Yu, J. Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin and R. J. Schoelkopf, “Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box”, *Physical Review A*, 76, 042319 (2007).
- [10] P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson and W. D. Oliver, “A quantum engineer’s guide to superconducting qubits”, *Applied Physics Reviews*, 6, 021318 (2019).
- [11] R. Flint, “Dilution Refrigerators Cool QPUs Below 20 Millikelvin”, from <https://quantumzeitgeist.com/dilution-refrigerators-cool-qpus-millikelvin/>. Access on July 30th, 2026.